

## ВПЛИВ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА АДГЕЗІЮ ПОВЕРХНЕВИХ ПОКРИТЬ ДО ОПУКЛИХ І УВІГНУТИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Розкрито основні механізми впливу пружних деформацій на адгезію поверхневих покриттів, нанесених на фігурні деталі. Запропоновано математичну модель деформаційних змін адгезії поверхневих покриттів до опуклих і увігнутих поверхонь деталей та результати її дослідження.

**Ключові слова:** пружні деформації, механічні напруження, покриття, адгезія.

Рассматриваются основные механизмы влияния упругих деформаций на адгезию поверхностных покрытий, нанесенных на фигурные детали. Предложена математическая модель деформационных изменений адгезии поверхностных покрытий к выпуклым и вогнутым поверхностям деталей, а также результаты ее исследования.

**Ключевые слова:** упругие деформации, механические напряжения, покрытие, адгезия.

The article deals with the basic mechanisms of resilient deformations influence on the adhesion of surface coatings deposited on figured details. The authors proposed a mathematical model of deformation changes of surface coatings adhesion to bend and curved parts surfaces and the results of research.

**Keywords:** resilient deformations, mechanical tensions, coating, adhesion.

Особливості еволюції сучасної електронної техніки ставлять нові вимоги до її компонентів: надійність, мініатюризація, застосування перспективних матеріалів. У таких умовах широкого застосування набули різноманітні поверхневі покриття (грунтувальні, захисні, декоративні, ізоляційні, провідникові, магнітні тощо). Залежно від виконуваних ними функцій вони повинні володіти задовільними і стабільними у часі характеристиками: твердістю, електропровідністю, електричною міцністю, магнітною сприйнятливістю тощо. Проте всі вони незалежно від їх призначення повинні характеризуватися задовільною адгезією до основи. Адже незадовільний рівень адгезії покриття може спричинити до його здуття або відшарування, що в свою чергу, може негативно відобразитися на працездатності деталі, складовою якої є дане покриття.

Одним із факторів, які впливають на адгезію є пружна деформація покриття, що викликає появу в них внутрішніх механічних напружень (ВМН) [1-5]. Тому важливо виявити механізми такого впливу і отримати кількісну оцінку деформаційних змін адге-

зії покриттів до деталей (основи) різної форми.

### Механізми впливу пружних деформацій на адгезію поверхневих покриттів

Поверхневі покриття наносяться не тільки на деталі плоскої форми, але й на вироби, які мають опуклі та увігнуті поверхні.

Як видно з рис.1, поперечний переріз таких поверхонь у багатьох випадках має вигляд кола.

Аналіз рис.1 показує, що в механічно напружених поверхневих покриттях, нанесених на опуклі і увігнуті поверхні деталей мають місце ефект Пуассона і краєві деформаційні ефекти, які сильніше проявляються з того боку, де є більші ВМН. Як відомо [6], ефект Пуассона полягає в тому, що пружна деформація поверхневого покриття з силою  $F_{np}$  у паралельному до поверхні основи напрямі

$$\varepsilon = \frac{F_{np}}{S \cdot E} = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

спричиняє його пружну деформацію  $\varepsilon$  протилежного знаку, яка дорівнює добутку коефіцієнта Пуассона  $\nu$  на модуль Юнга  $E$

$$\varepsilon' = -\nu \cdot E \quad (2)$$

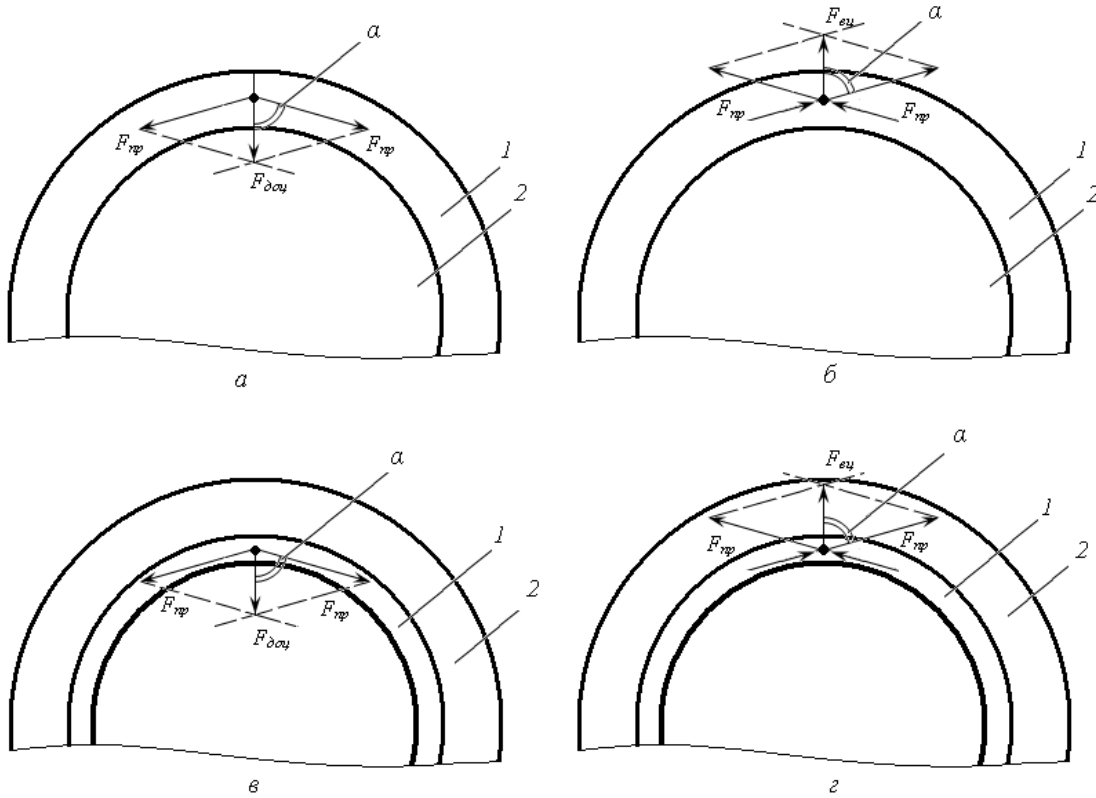


Рис. 1. Схематичне зображення пружних сил, діючих в поверхневих покриттях, нанесених на опуклі і (а, б) і увігнуті (в, г) сферичні поверхні деталей: 1 – поверхнєве покриття; 2 – деталь.

У співвідношеннях (1), (2)  $\sigma$  – ВМН в покритті, які визначаються експериментально, наприклад, методом голографічної інтерферометрії або Х-променевої дифрактометрії;  $S$  – площа поперечного перерізу покриття.

Якщо взяти деяку невелику ділянку покриття, то тоді систему "покриття–основа" можна розглядати як плоску, схематичне зображення якої наведено на рис.2. Бажання розтягнутого покриття звужитись у поперечному напрямі спричиняє появу відривальної сили  $F'_B$  (рис.2а), а бажання стиснутого поверхневого покриття розширитися у поперечному напрямі викликає появу стиснутої сили  $F'_C$  (рис.2б). Отже, плоский розтяг поверхневого покриття зменшує його адгезію до основи, а плоский стиск, навпаки, збільшує адгезію.

Іншою причиною виникнення відривальної сили  $F''_B$  є крайовий ефект, який полягає у тому, що нормальні до поперечного перерізу покриття ВМН, які діють на краях тріщин, подряпин та інших схожих дефек-

тів, перетворюються у нормальні до поверхні основи механічні напруження [5]. Причиною цього явища є відсутність з одного боку "сусідів", які б могли урівноважити пружну силу  $F_{пр}$  (рис.3).

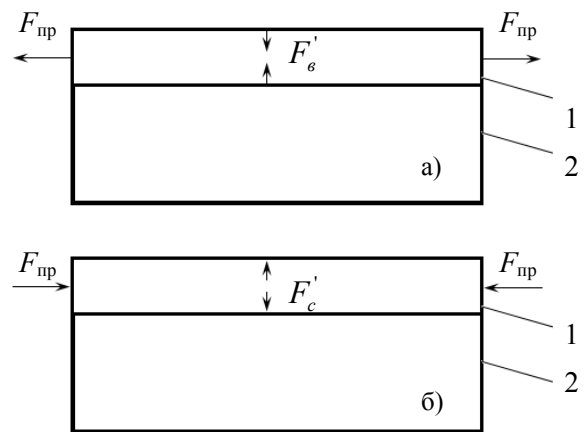


Рис. 2. Схематичне зображення пружної деформації ділянки поверхневого покриття в паралельному і перпендикулярному до поверхні основи напрямках: розтяг (а), стиск (б), 1 – поверхня покриття; 2 – основа.

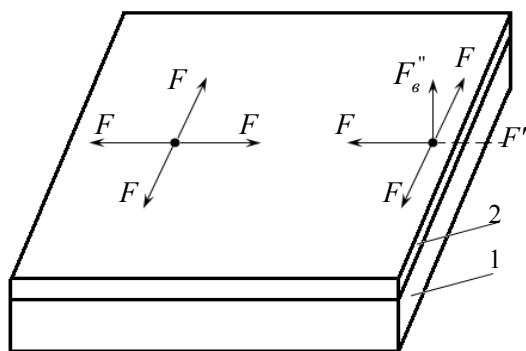


Рис. 3. Схематичне зображення механізму виникнення нормальної до поверхні основи відіривальної сили  $F_B''$ : 1 – основа; 2 – поверхневе покриття.

Разом з тим сферична з циліндрична поверхня деталей спричиняє появу додаткової доцентрової (при розтягу) або відцентрової (при стиску) пружної сили, яка впливає на адгезію.

Із рис. 1а,в видно, що розтягувальні ВМН викликають появу доцентрової пружної сили  $F_{доц}$ , яка збільшує адгезію поверхневого покриття, нанесеного на опуклу поверхню деталі і зменшує адгезію поверхневого покриття, нанесеного на увігнуту поверхню.

Стискувальні ВМН викликають зворотний деформаційний ефект, спричинений відцентровою пружною силою  $F_{вц}$ , яка зменшує адгезію поверхневого покриття, нанесеного на опуклу поверхню деталі, і збільшує адгезію поверхневого покриття, нанесеного на увігнуту поверхню.

### Оцінка величини деформаційних змін адгезії покриттів до опуклих і увігнутих деталей

З рис.1 видно, що за абсолютною величиною доцентрова і відцентрова пружні сили рівні Їх числове значення можна визначити із співвідношення:

$$|F_{доц}| = |F_{вц}| = 2F_{пр} \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

де  $F_{доц}$  – доцентрова рівнодійна пружних сил  $F_{пр}$ ;  $F_{вц}$  – відцентрова рівнодійна пружних сил;  $\alpha$  – кут між пружною силою і рівнодійною.

Числове значення пружних сил легко ви-

значається із виразу

$$F_{пр} = \sigma \cdot S. \quad (4)$$

Кут  $\alpha$ , величина якого залежить від радіусу кривизни поверхні, можна визначити графічно, виходячи з наступних міркувань.

Якщо радіус кривизни  $R$  великий (наприклад,  $R=100$  мм), то великим буде кут  $\alpha$ . При  $\alpha=90^\circ$  рівнодійна  $F_{доц} = F_{вц} = 2F_{пр} \cdot \cos \alpha = 0$ .

Якщо ж радіус кривизни малий (наприклад,  $R=10$  мм), то малим буде кут  $\alpha$ . При  $\alpha=0$  і рівнодійна  $F_{доц} = 2F_{пр} \cdot \cos \alpha = 2F_{пр}$ .

Описані два крайні випадки зображені на рис.4.

Оцінимо величину деформаційної зміни адгезії, зумовленої кривизною поверхні. Наприклад, якщо круглий металевий корпус тунельного напівпровідникового діода радіусом  $R=2,5$  мм і висотою  $h=5$  мм покритий цинковою захисною плівкою товщиною  $d=1$  мкм, в якій діють розтягувальні ВМН величиною  $\sigma=10^8$  Па, то відповідно до (4) величина діючої в покритті розтягувальної сили становить

$$F_{пр} = \sigma S = \sigma dh = 5 \cdot 10^{-1} \text{ Н.}$$

У цьому випадку величина доцентрової сили, яка збільшує адгезію покриття буде становити:

$$F_{доц} = 2F_{пр} \cos \alpha = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-1} \text{ Н} \cdot \cos 3^\circ = 1 \text{ Н.}$$

Доцентрова сила  $F_{доц}$ , віднесена до площі бічної поверхні циліндричного корпусу

$$S_\delta = 2\pi Rh = 78,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

визначає величину деформаційного збільшення адгезії плівки:

$$\Delta \sigma_a = \frac{F_{доц}}{S_b} = 12739 \text{ Па.}$$

При адгезії до плоскої поверхні  $\sigma_a=10^6$  Па величина  $\Delta \sigma_a=12739$  Па, що становить приблизно 1,3%. При  $\sigma_a=10^9$  Па,  $\sigma_a=10^6$  Па  $\Delta \sigma'_a = 13\%$ . Виходить, що опуклі і увігнуті поверхні деталей з малим радіусом кривизни ( $R=10$  мм) змінюють адгезію покриттів на величину порядку 1,3...13%.

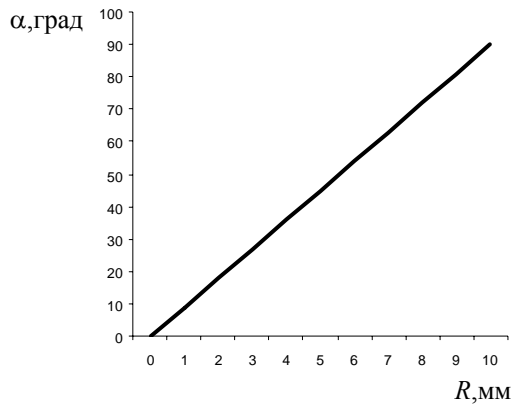


Рис. 4. Залежність кута  $\alpha$  від радіуса кривизни деталі.

### Висновки

Пружні деформації, змінюючи відстані між атомами, спричиняють появу крайового ефекту і ефекту Пуассона, які змінюють адгезію поверхневих покриттів на відрив. Розтягувальні ВМН зменшують адгезію на відрив, а стискувальні ВМН, навпаки, збільшують її.

У пружно деформованих поверхневих покриттях, нанесених на опуклі і увігнуті поверхні, додатково виникає доцентрова (при розтягу) або відцентрова (при стиску) пружна сила, яка впливає на їх адгезію на відрив.

Розтягувальні ВМН збільшують адгезію поверхневого покриття, нанесеного на опуклу поверхню деталі і зменшують адгезію поверхневого покриття, нанесеного на прогнуту поверхню деталі. Стискувальні ВМН викликають зворотній деформаційний ефект.

Встановлено, що залежно від величини ВМН абсолютна величина деформаційних змін адгезії поверхневих покриттів, нанесених на опуклі або опуклі і увігнуті деталі з малим радіусом кривизни складає від одиниць до десятків відсотків.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю. Нанесение покрытий плазмой. – М.: Наука, 1990. – 408 с.
2. Бабушкин Г.А., Буланов В.Я., Соловьев Л.В. Диффузионно-кинетический механизм сцепления порошкового покрытия с подложкой (общие и предельные соотношения) / Теоретические исследования и практическое применение плазменных покрытий: Сб. статей. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983. – С.3-9.
3. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. Детонационное напыление покрытий. – Ленинград: Судостроение, 1978. – 200 с.
4. Костиков В.И., Шестерин Ю.А. Плазменные покрытия. – М.: Металлургия, 1978. – 159 с.
5. Дружинин Л.К., Кудинов В.В. Получение покрытий высокотемпературным распылением / Получение покрытий высокотемпературным распылением: Сб. Статей. – М.: Атомиздат, 1973. – С. 7-59.
6. Епифанов Г. И., Мома Ю. А. Физические основы конструирования РЭА и ЭВА. – М.: Советское радио, 1979. – 350 с.